

AperTO - Archivio Istituzionale Open Access dell'Università di Torino

Neutron scattering material analysis of Bronze Age metal artefacts

This is the author's manuscript

Original Citation:

Availability:

This version is available <http://hdl.handle.net/2318/80041> since

Published version:

DOI:10.1088/0953-8984/20/10/104253

Terms of use:

Open Access

Anyone can freely access the full text of works made available as "Open Access". Works made available under a Creative Commons license can be used according to the terms and conditions of said license. Use of all other works requires consent of the right holder (author or publisher) if not exempted from copyright protection by the applicable law.

(Article begins on next page)

Applicazione in sotterraneo di tecniche fotografiche e GPR per il rilievo di discontinuità

Giorgio Costantini,* Cesare Comina,* Anna Maria Ferrero,* Gessica Umili,* Sabrina Bonetto*

Sommario

Il rilievo delle caratteristiche geometriche delle discontinuità all'interno di un ammasso roccioso è di fondamentale importanza per la valutazione dei blocchi che queste contribuiscono a definire ed isolare. Tuttavia, in particolari contesti, come quello delle cave di pietre ornamentali, le metodologie di rilievo tradizionali **possono portare** a risultati imprecisi ed incompleti, dovuti alle condizioni dei fronti e dell'ambiente di scavo. Per ovviare, almeno parzialmente, a suddetti limiti, sempre più frequentemente si utilizzano tecniche di rilievo di non-contatto, basate ad esempio sull'impiego della fotografia digitale per la mappatura delle tracce dei piani di discontinuità. Ad **essasi** possono affiancare indagini geofisiche, come il georadar, che permette di definire anche lo stato di fratturazione interno dell'ammasso roccioso. In questo lavoro si è valutata l'applicabilità di tali tecniche all'interno di Cava Piastreta, una cava di marmo in sotterraneo nelle Alpi Apuane. L'impiego del georadar si è dimostrato particolarmente efficace, **poiché in** grado di **operare in** modo ottimale su pareti di scavo perfettamente lisce, restituendo risultati coerenti con quelli ottenuti mediante rilievo tradizionale. Di contro la tecnica di non-contatto proposta ha sofferto di limitazioni imposte dalle condizioni dei fronti studiati.

1. Introduzione

In ambito estrattivo, per quanto riguarda sia le cave in sotterraneo sia quelle a cielo aperto, vi sono numerose problematiche di natura geologica che possono interferire con la sicurezza degli scavi, con la sostenibilità ambientale della coltivazione e con l'ottimale sfruttamento della risorsa.

La sicurezza di un cantiere estrattivo può essere inficiata, in primis, dalle caratteristiche strutturali e meccaniche dell'ammasso roccioso coltivato. Tali caratteristiche possono **portare all'isolamento** di blocchi instabili di varia dimensione e dar **luogo a** fenomeni di crollo, oppure possono diminuire la capacità portante di **elementi** svolgono una funzione di sostegno per l'ambiente sotterraneo.

Uno degli aspetti principali del rilievo degli ammassi rocciosi è la valutazione delle caratteristiche geometriche delle discontinuità all'interno dell'ammasso, nonché dei blocchi che queste contribuiscono a definire ed isolare [ISRM, 1978]. In particolari contesti, come quello delle cave di pietre **ornamentali, tuttavia**, le metodologie di rilievo tradizionali **possono portare** a risultati imprecisi ed incompleti, **dovuti ai** limiti di accessibilità ai **fronti di** scavo, ai tempi a disposizione per le analisi in sito, all'assenza di evidenze superficiali di discontinuità interne all'ammasso. La necessità è quella di ridurre al minimo i tempi delle operazioni di rilievo al **fronte per** evitare lunghe interruzioni delle opera-

zioni di estrazione e garantire le condizioni di sicurezza di chi effettua il rilievo. Per rispondere a tali necessità ed ovviare ad alcuni dei limiti del rilievo tradizionale, sempre più frequentemente si utilizzano tecniche di rilievo di non-contatto basate sull'impiego della **fotogrammetria digitale** o del laser scanner. Queste tecniche consentono, tramite l'acquisizione, rispettivamente, di immagini digitali **enunciate** di punti dei fronti studiati, di limitare i tempi di indagine ed interferire di meno con le attività estrattive. L'avere a disposizione le immagini e il modello digitale della parete rocciosa permette di lavorare senza limitazioni di tempo, potendo eseguire nuove misure ed elaborazioni ogni qualvolta sia necessario. La metodologia di non-contatto permette di risolvere i problemi connessi all'accessibilità, fornendo una descrizione della morfologia dell'intera parete; essa risulta inoltre adeguata dal punto di vista della sicurezza degli operatori.

I prodotti del rilievo **laser** fotogrammetrico o laser scanner possono essere successivamente interpretati **con diverse** tecniche rivolte alla definizione delle caratteristiche geometriche dei principali piani di discontinuità, in maniera analoga a quanto ottenibile con i rilievi tradizionali. Si possono ad esempio applicare tecniche di **mappatura bidimensionale** delle tracce di **discontinuità mediante** immagini [Crosta, 1997; REIDE HARRISON, 2000; POST *et al.*, 2001; KEMENY E POST, 2003; LEMYE HADJIGEORGIOU, 2003; DEBET *et al.*, 2008; MOHEBBI *et al.*, 2017] o analisi di tipo tridimensionale operando su Modello Digitale di Superficie (DSM) della parete rocciosa, utilizzando codici automatici o semi-automatici per la stima dell'orientazione dei piani di discontinuità [KEMENY

¹ Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino, Torino, Italia

E DONOVAN, 2005; RONCELLA E FORLANI, 2005; TRINKSET *al.*, 2005; FENG E ROSHOFF, 2006; HANEBERG, 2006; SLOBET *al.*, 2007; FERRERO *et al.*, 2009; STURZENEGGER E STEAD, 2009; GIGLI E CASAGLI, 2011; LATO E VÖGE, 2012; RIQUELME *et al.*, 2014] e metodi semi-automatici per l'estrazione di tracce di discontinuità [UMILI *ET al.*, 2013; LI *et al.*, 2016; CAO *et al.*, 2017], utili ai fini della stima della persistenza. L'assunzione alla base dei metodi tridimensionali è la constatazione che gli affioramenti naturali possono avere infinite forme e dimensioni, ma la caratteristica che li accomuna è la superficie non piana: in generale essa presenta porzioni piane e spigoli, corrispondenti ad asperità o depressioni, nella maggior parte dei casi create dall'intersezione di diversi piani di discontinuità. Di conseguenza è possibile riconoscere ed estrarre dal DSM, con un certo grado di automatizzazione, sottoinsiemi di punti che appartengono a piani o tracce di discontinuità: pertanto le operazioni di calcolo sono riconducibili all'interpolazione di tali sottoinsiemi mediante piani o polilinee.

Ne consegue che i metodi di rilievo non a contatto delle caratteristiche geometriche sono applicabili con successo negli affioramenti naturali; in galleria e su pareti scavate con mezzi meccanici o esplosivo il livello di efficacia di tali metodi può decrescere significativamente, all'aumentare della percentuale di elementi della superficie dovuti alla fratturazione indotta dai mezzi di scavo.

Per ovviare a tali limitazioni è possibile impiegare tecniche di indagine geofisica basate, per esempio, sull'utilizzo del Ground Penetrating Radar (GPR). Il GPR è rivolto principalmente alla localizzazione di oggetti o di interfacce sepolte al di sotto di una superficie di indagine o situate all'interno di una struttura [DANIELS, 2004]. L'applicazione del GPR è basata sulla propagazione e la riflessione del segnale elettromagnetico ad alta frequenza (10 MHz – 2,5 GHz) e prevede l'impiego di un sistema di acquisizione costituito da un'antenna trasmittente, un'antenna ricevente e un'unità di controllo e registrazione dei dati. Se durante la propagazione nel mezzo indagato l'onda elettromagnetica incontra un'interfaccia o un oggetto con caratteristiche dielettriche differenti, l'energia viene in parte o completamente diffratta o riflessa e torna di conseguenza verso la superficie, dove viene captata dall'antenna ricevente. La profondità d'indagine del GPR è strettamente dipendente dalle caratteristiche elettromagnetiche dell'ammasso studiato nonché dalla frequenza centrale dell'antenna utilizzata. Ragionevolmente in ammassi rocciosi compatti ad elevata resistività elettrica (tipo i marmi) la profondità d'indagine può essere anche di 10-15 m.

L'output che si ottiene, definito radargramma, corrisponde quindi ad una sezione bidimensionale del mezzo indagato, orientata perpendicolarmente alla superficie su cui si effettua l'acquisizione. Il ra-

dargramma è espresso in dominio di tempo e può essere trasformato in termini di profondità di indagine, conoscendo la velocità di propagazione delle onde all'interno del mezzo [DANIELS, 2004]. In passato vari autori hanno proposto l'utilizzo del GPR, anche in contesti che riguardano l'estrazione di pietre ornamentali [DÉROBERT E ABRAHAM, 2000; ORLANDO, 2003; VACCANEO *et al.*, 2004; PORSANI *et al.*, 2006; FERRERO *et al.*, 2007; KADIOGLU, 2008; REY *et al.*, 2015]. Il GPR presenta parzialmente le medesime limitazioni delle tecniche di rilievo tradizionali essendo necessario accedere al fronte per la movimentazione dell'antenna sulla superficie rocciosa. In particolari contesti è per cui necessario prevedere l'utilizzo di carrelli mobili o bracci elevatori. Fatte salve tali limitazioni i vantaggi nell'uso del GPR rispetto ai metodi di rilievo tradizionali consistono nella velocità di acquisizione dei dati e nella possibilità di indagare anche l'interno dell'ammasso roccioso studiato, verificando la continuità in profondità delle discontinuità osservabili al fronte o individuandone di nuove.

In questo lavoro, si è valutata l'applicabilità sia dei metodi fotogrammetrici di non-contatto sia della tecnica GPR per l'individuazione dei piani di discontinuità all'interno di una cava di marmo in sotterraneo, denominata Cava Piastrera (Massa), compresa nel complesso montuoso delle Alpi Apuane. I metodi di rilievo menzionati sono stati applicati ad alcune porzioni della cava ritenute maggiormente significative dal punto di vista strutturale e i risultati sono stati confrontati con i dati derivanti da un rilievo geomeccanico tradizionale speditivo.

2. Caso di studio

La cava oggetto di studio è denominata cava Piastrera ed è ubicata nel complesso montuoso delle Alpi Apuane, in località Alto di Sella, nel comune di Massa. Il comparto marmifero di Piastrera si sviluppa interamente sul versante occidentale del Monte Sella e Alto di Sella. La coltivazione si sviluppa in sotterraneo mediante lo schema a camere e pilastri, con camere di coltivazione sviluppate principalmente in direzione NE-SW per una lunghezza media di 90 m e una larghezza di circa 25 m. Per effettuare lo scavo si utilizza la tagliatrice a catena, che consente di ottenere blocchi pressoché lisci.

Per quanto riguarda l'assetto geologico, nella zona interessata dall'attività estrattiva affiorano le formazioni metamorfiche dell'Unità delle Apuane, composte da un basamento paleozoico su cui giace in discordanza una sequenza metasedimentaria meso-cenozoica (Trias sup.-Oligocene). Il basamento paleozoico è formato da filladi quarzitiche, metavulcaniti, metarenarie e filladi, filladi scure e dolomie ad *Orthoceras* e calcescisti [SIRGIOVANNI, 2009].

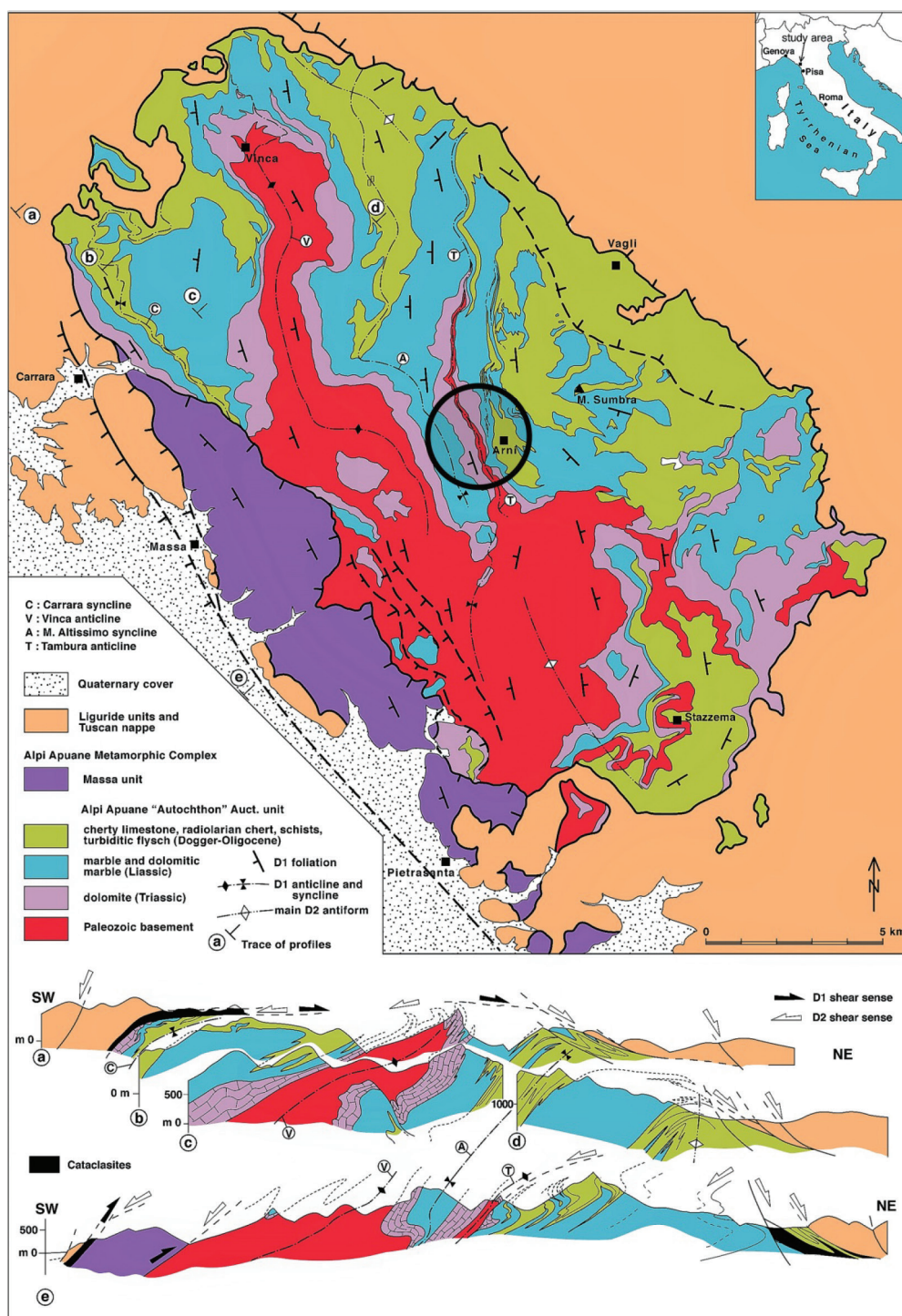


Fig. 1 – Schema tettonico della zona delle Alpi Apuane [Carmignani *et al.*, 2006]. La posizione della cava è indicata dal cerchio nero.

Fig. 1 – Tectonic sketch of the Apuane Alps zone [Carmignani *et al.*, 2006]. Quarry location is indicated by the black circle.

Le rocce della sequenza **metasedimentariame-so-cenozoica** includono sottili depositi continentali e di acqua bassa, simili al Verrucano (conglomerato quarzoso di ambiente continentale) **emetasedimenti** di piattaforma carbonatica, comprendenti dolomie, marmi e marmi dolomitici (Formazione dei Marmi). A questi fanno seguito calcescisti, metacalcari con

selci e metaradiolariti. Seguono calcescisti e filladi legati alla sedimentazione pelagica durante lo sprofondamento della precedente piattaforma carbonatica. La successione sedimentaria dell'Unità delle Apuane si chiude infine **conmetarenarietorbiditiche**.

La copertura meso-cenozoica (così come il basamento paleozoico) ha subito metamorfismo alpino

in facies Scisti Verdi con picco metamorfico a pressioni di 0.4-0.6 GPa e temperature di 350°-450°C [DI PISA *et al.* 1985; FRANCESCHELLI *et al.*, 1986; JOLIVET *et al.*, 1998; MOLLI *et al.*, 2000].

Sotto il profilo strutturale la zona interessata dall'attività estrattiva è situata all'interno dell'anticlinale del Monte Tambura e in questo settore affiora unicamente la Formazione dei Marmi con scistosità immergente verso W (Fig. 1).

Per quanto riguarda la giacimentologia, alla scala dell'intero sviluppo sotterraneo di Cava Piastreta, si rilevano quattro varietà merceologiche di marmo: Bianco Ordinario, Calacata, Arabescato, Brouillè. Queste nel complesso presentano un buon grado di omogeneità sia tessiturale che composizionale. Inoltre, eccetto due zone in cui si nota una concentrazione della deformazione fragile, il grado di fratturazione alla scala dell'intero sotterraneo può considerarsi basso e ciò, insieme all'omogeneità del materiale, permette di estrarre blocchi di ottima qualità ed elevato pregio.

3. Raccolta ed elaborazione dati

3.1. Rilievo geomeccanico tradizionale

Al fine di ottenere dati utili alla validazione dei risultati delle due tecniche di indagine testate in questo studio, presentati nei paragrafi successivi, è stato eseguito un rilievo geomeccanico tradizionale [ISRM, 1978]. I dati acquisiti sono stati poi confrontati ed integrati con alcuni lavori presenti in bibliografia, relativi all'areadi studio [VASELLI *et al.*, 2007; SIRGIOVANNI, 2009].

Tab. I – Orientazione dei 5 sistemi di discontinuità individuati mediante rilievo tradizionale.

Tab I – Orientation of 5 discontinuity sets identified from traditional survey.

Sistema	Dip/Dip Direction [°]
K1	56/111
K2	68/165
K3	55/226
K4	70/342
K5	78/025

Le discontinuità sono state rilevate seguendo un metodo random sull'intero sotterraneo: in sostanza non sono stati utilizzati stendimenti o finestre di rilievo, ma si è concentrato il rilievo sulle discontinuità evidenti lungo fronti e pareti di scavo, acquisendone l'orientazione. In totale sono state censite ed analizzate circa 180 superfici di frattura. I dati sono stati successivamente rappresentati graficamente mediante il software *Dips* (Rocscience): dall'analisi delle concentrazioni dei poli sono stati identificati 5 sistemi di discontinuità (Tabella 1), denominati rispettivamente K1, K2, K3, K4, e K5 (Figura 2).

3.2. Tecniche di non contatto: mappatura automatica delle tracce delle discontinuità

L'applicazione di queste tecniche di non-contatto per il rilievo dei piani di discontinuità su DSM è risultata inapplicabile, poiché le pareti di scavo sono quasi

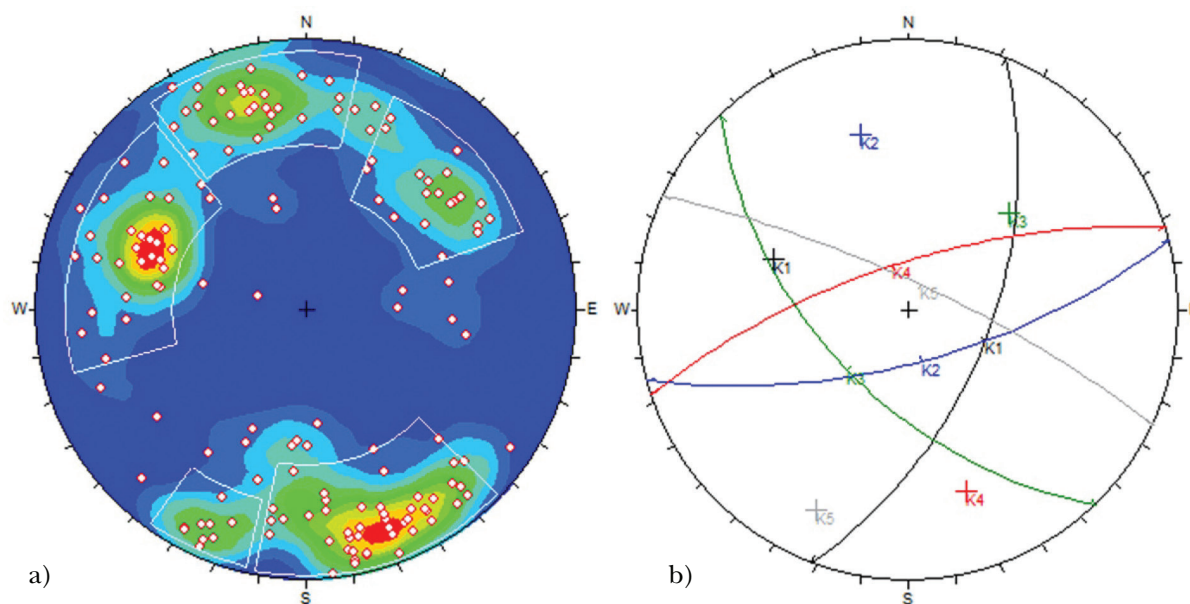


Fig. 2 – a) dispersione dei poli dei piani misurati mediante il rilievo tradizionale; b) tracce ciclografiche e poli dei 5 sistemi di discontinuità individuati.

Fig. 2 – a) dispersion of poles identified during traditional survey; b) cyclographic traces and poles of the 5 identified discontinuity sets.

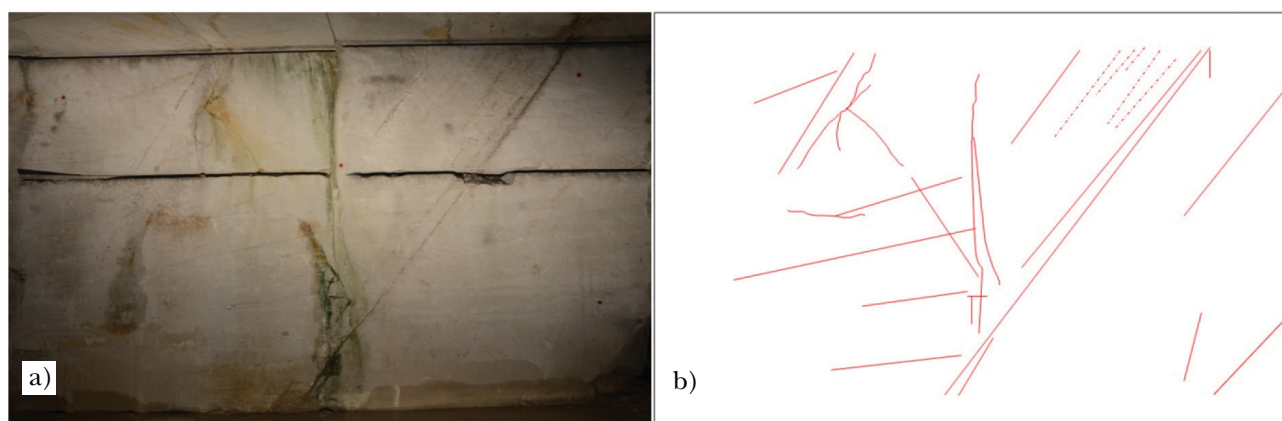


Fig. 3 – Esempio di a) immagine originale, b) mappa delle tracce redatta manualmente sulla base dell'immagine originale.
 Fig 3 – Example of a) original image, b) manually drawn trace map based on the original image.

perfettamente lisce e di conseguenza non sono presenti piani affioranti. Per lo stesso motivo non si è potuto procedere all'individuazione tridimensionale delle tracce. Pertanto si è **adottata una** tecnica di elaborazione di immagini **digitali** per la **mappatura bidimensionale** delle tracce di discontinuità, basata sulla sola informazione colorimetrica.

Si è scelto di acquisire le immagini in corrispondenza di fronti di scavo costituiti da marmo Bianco Ordinario, il quale, ancora di più rispetto alle altre tre varietà merceologiche presenti nell'area, **mostra una** elevata omogeneità tessiturale e compositiva. Pertanto, in condizioni ottimali (buona illuminazione del fronte, assenza di venute d'acqua, ecc.) la gamma dei colori attesa era teoricamente abbastanza limitata, tale da giustificare l'assunzione che gli elementi lineari **identificabili** nelle immagini **comunesignificative** variazioni cromatiche, potessero corrispondere a tracce di discontinuità.

Le immagini sono state scattate in corrispondenza di 4 fronti di scavo, utilizzando una fotocamera digitale Nikon D7000 montata su cavalletto ed impostando massima risoluzione e tempo di esposizione di 1 secondo (Fig. 3a). Il processamento dei fotogrammi è stato effettuato utilizzando un codice di calcolo appositamente sviluppato in ambiente Matlab. Tale codice dapprima aumenta il contrasto dell'immagine digitale e successivamente la converte in un'immagine a scala di grigi. Questa operazione mette in evidenza le tracce delle discontinuità sia rispetto alla tessitura della matrice rocciosa, sia ad alterazioni del colore dovute a venute d'acqua. Sull'immagine così ottenuta viene poi applicato l'operatore di Sobel [SOBELE FELDMAN, 1968]. Tale operatore, finalizzato al riconoscimento dei contorni (edge detection), è basato sulla valutazione del gradiente della luminosità: in sostanza, ad ogni pixel dell'immagine originaria viene applicata una matrice di convoluzione (3x3) per calcolare valori approssimati della derivata della funzione luminosità

nella direzione scelta (direzione orizzontale, X, o verticale, Y) dell'immagine. Il risultato di questa operazione è una nuova matrice che ha le stesse dimensioni dell'immagine originaria e contiene solo valori di gradiente: i pixel con valori elevati rappresentano pertanto probabili contorni. Nel codice si è scelto di applicare il filtro di Sobel lungo entrambe le direzioni e di **combinarne i** risultati, consapevoli che gli elementi che si estendono in queste direzioni risulteranno più evidenti rispetto ad altri con inclinazione diversa.

Confrontando la figura originale (Fig. 4a) con il risultato dell'elaborazione (Fig. 4b), è evidente che alcuni elementi lineari individuati rappresentano dei falsi positivi, che possono essere ricondotti ad esempio a tagli causati dalle operazioni di estrazione dei blocchi o a variazioni cromatiche dovute a filtrazioni d'acqua. Per contro, è possibile che effettive tracce di discontinuità con diversa inclinazione non siano facilmente o completamente riconoscibili nell'immagine processata: confrontando la mappa delle tracce redatta manualmente (Fig. 3b) con l'immagine delle tracce messe in evidenza mediante la procedura sviluppata (Fig. 4b) si osserva come effettivamente alcune tracce siano solo parzialmente presenti.

L'immagine ottenuta, che rappresenta una mappa da interpretare e non un vero e proprio database numerico, necessita pertanto di una fase di editing manuale per poter rappresentare una mappa delle tracce: l'operatore deve eliminare i falsi positivi, selezionare le porzioni effettivamente corrispondenti alle tracce di discontinuità e collegare i tratti appartenenti alla stessa traccia.

Questa tecnica, se opportunamente integrata con altre metodologie di rilievo che permettano di attribuire le tracce (mediante il solo dato di inclinazione apparente, poiché essendo le pareti perfettamente lisce non c'è evidenza di porzioni di discontinuità affioranti) a famiglie di discontinuità di orien-

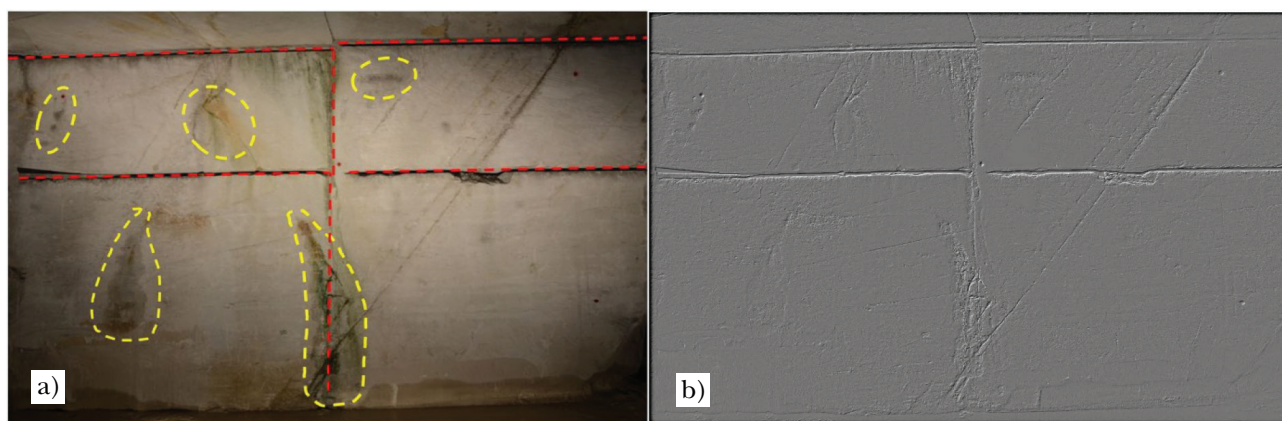


Fig. 4 – a) effetto delle operazioni di taglio (rosso) e zone di alterazione cromatica (giallo), b) mappa delle tracce ottenuta mediante la procedura sviluppata.

Fig. 4 – a) effect of cutting operations (red) and chromatic alteration (yellow), b) trace map obtained from the developed procedure.

tazione nota, può essere uno strumento di supporto alle tecniche di rilievo tradizionali quando si opera su ammassi rocciosi in particolari condizioni di accessibilità.

3.3. Rilievo con GPR

Per l'acquisizione dei dati GPR è stato utilizzato il Georadar IDS K2 – DAD 2CH-MCH con antenne IDS da 200 MHz e GSSI da 500 MHz, dotate di timone di trascinamento e ruota metrica WHEEL 50. L'indagine georadar è stata condotta su un pilastro situato alla fine della rampa di accesso al sotterraneo (Fig. 5a). Sono state effettuate strisciate su due lati del pilastro (lati "sud" ed "ovest" in figura 5a), tralascian-

do gli altri a causa dell'inagibilità dovuta dall'avanzamento della coltivazione. Il rilievo è stato **svoltomediante** l'esecuzione **dipiù** strisciate a diverse altezze, a mezzo di carrello elevatore mobile, sul **medesimo lato** analizzato; ciascuna strisciata orizzontale è stata acquisita procedendo da destra verso sinistra (Fig. 5b). Lo scopo era quello di avere segnali distribuiti nello spazio utili per **una valutazione** tridimensionale dell'orientazione dei piani di discontinuità; tuttavia un'analisi completamente tridimensionale del dato radar non è stata possibile, date le limitazioni nel numero e nella tipologia di strisciate possibili compatibilmente con le operazioni di cava.

I dati acquisiti sono stati processati utilizzando il software *Reflexw 5.0*, grazie al quale è stato possibile applicare la sequenza di **operazioni considerate** più

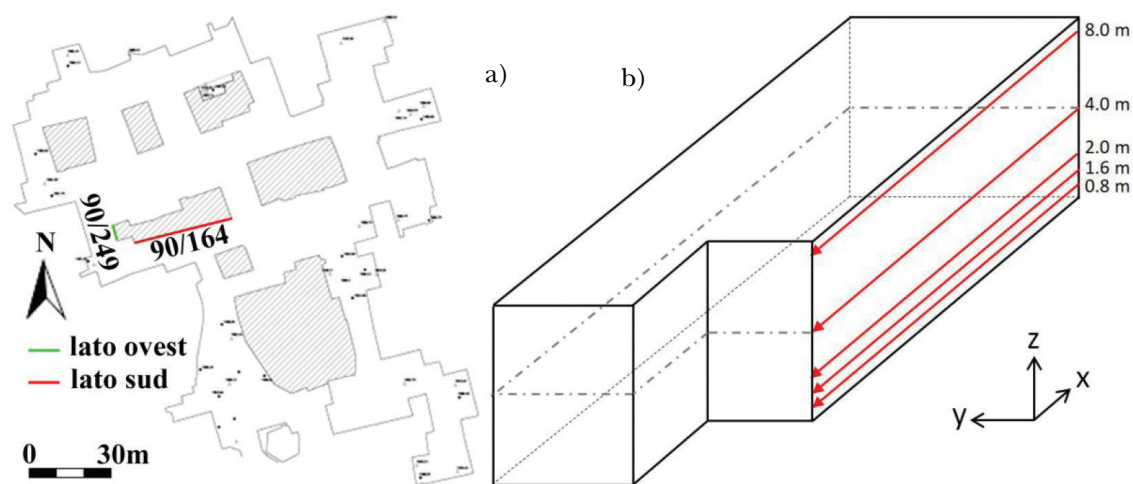


Fig. 5 – a) Estratto della planimetria di Cava Piastrera, con indicazione dei due lati del pilastro e della loro orientazione (dip/dip direction); b) schema del pilastro e configurazione delle strisciate eseguite con GPR, con indicazione della direzione di ogni strisciata (freccia rossa) e piano di visualizzazione della sezione (linea tratteggiata).

Fig. 5 – a) Extract of Cava Piastrera layout, with indication of the two surveyed pillar sides and their orientation (dip/dip direction); b) scheme of the pillar and GPR strips configuration, with indication of the direction of each strip (red arrow) and plane of visualization of the section (dashed line).

adatta a minimizzare il rapporto segnale/rumore ed a valorizzare il tipo di anomalia cercata (movestart-time, time cut, dewow, bandpassfrequency, gain function, background removal, **stacktraces**, **subtrating-average**). Terminata la fase di processing, si è proceduto con l'analisi dei radargrammi al fine di individuare i principali eventi di riflessione e passare alla successiva fase di **selezionedei** punti giacenti su ogni singolo evento di riflessione ritenuto significativo, in modo da ricavarne la sua ubicazione spaziale. Ogni evento di riflessione è stato infatti interpretato come il risultato dell'interazione tra l'onda elettromagnetica ed un'anomalia all'interno dell'ammasso roccioso, quale un piano di discontinuità. Per ciascun radargramma si sono dunque estratte le coordinate (x, y) dei punti (x indica la distanza progressiva dal punto di partenza della strisciata, y corrisponde alla direzione di avanzamento della coltivazione) appartenenti agli eventi di riflessione e si è impostata per ciascuna coppia di valori, la terza coordinata z, attribuendole il valore dell'altezza dal suolo a cui è avvenuta la strisciata. Al termine di questa fase, si sono quindi ottenuti **gliinsiemi** di punti giacenti su ogni singolo evento di riflessione, che nel seguito verranno **chiamatipolilinee**. A titolo di esempio si riportano i radargrammi (Fig. 6) relativi alle 5 strisciate orizzontali effettuate sul lato sud del pilastro, posizionate, rispettivamente, a 0,8, 1,6, 2, 4 e 8 metri

di altezza dal pavimento della galleria. In tali radargrammi risulta evidente la presenza di isolati piani di discontinuità, evidenziati in nero, nonché la superficie di fondo del pilastro analizzato (a profondità variabile da un minimo di 6.5 m ad un massimo di 11.5 m). Tramite questo secondo dato è stato possibile convertire la sezione tempi in profondità.

Mediante la visualizzazione 3D delle polilinee è stato infine possibile **discriminarequelle** che si ripetono su radargrammi acquisiti a diverse altezze dello stesso fronte e che, data la loro ripetitività, possono rappresentare l'intersezione tra il piano su cui si propaga il segnale georadar e un unico piano **checo**-**stituisce** la discontinuità.

Per stimare la giacitura di tale piano, si è infine eseguita una Direct Linear Transformation (DLT), ovvero una stima ai minimi quadrati della giacitura del piano che meglio interpola la nuvola costituita da tutti i punti appartenenti alle polilinee selezionate. Le seguenti equazioni [FERRERO *et al.*, 2009] sono state utilizzate per il calcolo della Dip e della Dip Direction di ogni superficie presunta:

$$dip = \arccos(c) \quad (1)$$

$$dip\ direction = k \pm \arctan(a, b) \quad (2)$$

dove k è una costante che può essere 0° o 180° in funzione del quadrante, mentre a, b e c sono i co-

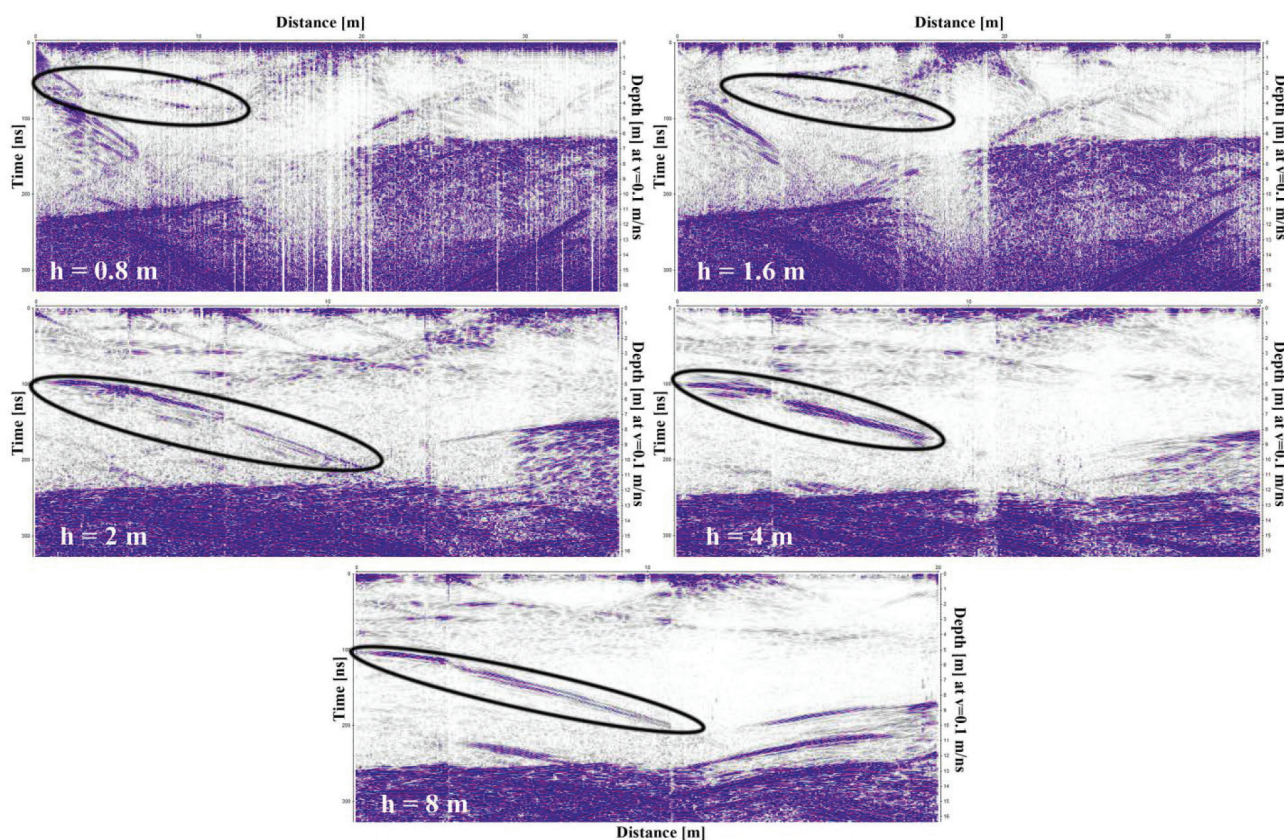


Fig. 6 – Esempio di eventi di riflessione significativi (nero) evidenziati sui radargrammi acquisiti a quote crescenti.
Fig. 6 – Examples of significant reflection events (black) highlighted on radargrams acquired at increasing height.

Tab. II – Orientazione dei piani rilevati mediante GPR sul lato ovest.

Tab. II – Orientation of discontinuity planes surveyed by GPR on west side.

id	Dip/Dip Direction [°]
P1w	86/065
P2w	88/296
P3w	89/248
P4w	87/298
P5w	89/254
P6w	70/248

efficienti dell'equazione di un piano espresso nella forma $ax + by + cz + d = 0$. In questo modo si è stimata la giacitura nello spazio di 12 superfici di discontinuità, 6 sul lato Ovest (P1w) (Tab. II) e 6 sul lato Sud (P1s) (Tab. III).

Successivamente, sono state prese in esame le polilinee che non presentavano omologhi in corrispondenza alle varie strisciate, considerandole comunque potenziali anomalie associate a piani. Tali polilinee sono state individuate localmente in strisciate eseguite a diverse altezze lungo il pilastro. Per ognuna delle polilinee individuate si è calcolata la retta interpolante, stimandone l'angolo con il nord, valutato in senso orario (strike). Date le orientazioni individuate sono possibili due direzioni di immersione, che differiscono fra loro di 180°. Estrarre informazioni sulla direzione di immersione dai dati a disposizione non è stato possibile stante la scarsità di punti interpolanti ai quali fare riferimento e la relativa spaziatura tra le varie strisciate. Pertanto, si è scelto di attribuire il valore di Dip Direction più simile a quello di uno dei set identificati mediante il rilievo tradizionale ed avente più simile direzione di immersione (Tab. IV).

Tab. IV – Orientazione dei piani derivati da anomalie singole.

Tab. IV – Orientation of discontinuity planes obtained from single anomalies.

id	Dip Direction calcolata [°]	Set attribuito	Orientazione assunta [°]
S1	323	K4	70/323
S2	344	K4	70/344
S3	26	K5	78/026
S4	21	K5	78/021
S5	24	K5	78/024
S6	18	K5	78/018
S7	357	K4	70/357
S8	330	K4	70/330
S9	102	K1	56/102
S10	232	K3	55/232
S11	234	K3	55/234

Tab. III – Orientazione dei piani rilevati mediante GPR sul lato sud.

Tab. III – Orientation of discontinuity planes surveyed by GPR on south side.

id	Dip/Dip Direction [°]
P1s	87/035
P2s	65/010
P3s	52/355
P4s	67/330
P5s	81/325
P6s	51/326

Tutti i piani ottenuti sono stati rappresentati su stereogramma (Fig. 7a) con l'obiettivo **diverificare** la congruenza delle orientazioni ottenute con il GPR rispetto alle discontinuità riscontrate durante il rilievo tradizionale (Fig. 7b). Dal confronto (Fig. 7), seppur le due tecniche siano state applicate a scale di osservazione differenti e nonostante i poli dei piani ricavati dall'elaborazione dei radargrammi presentino una minore rappresentatività statistica, è possibile affermare che sul pilastro indagato con il GPR prevalgono discontinuità appartenenti ai sistemi denominati K1, K3, K4, K5 (Fig. 7a).

Le differenze osservabili potrebbero essere imputate più che ad una imprecisione derivante dall'acquisizione e analisi del dato radar, ad una difficoltà dei sistemi tradizionali di rilievo geomeccanico nello stimare l'orientazione di un piano nel caso di fronti perfettamente lisci, ove, nella maggior parte dei casi, è possibile osservare solo tracce di discontinuità e non porzioni affioranti.

Altre incongruenze potrebbero essere dovute al fatto che con l'indagine GPR risulta più agevole l'individuazione di quelle tracce relative a piani sub-paralleli al fronte su cui si esegue l'acquisizione,

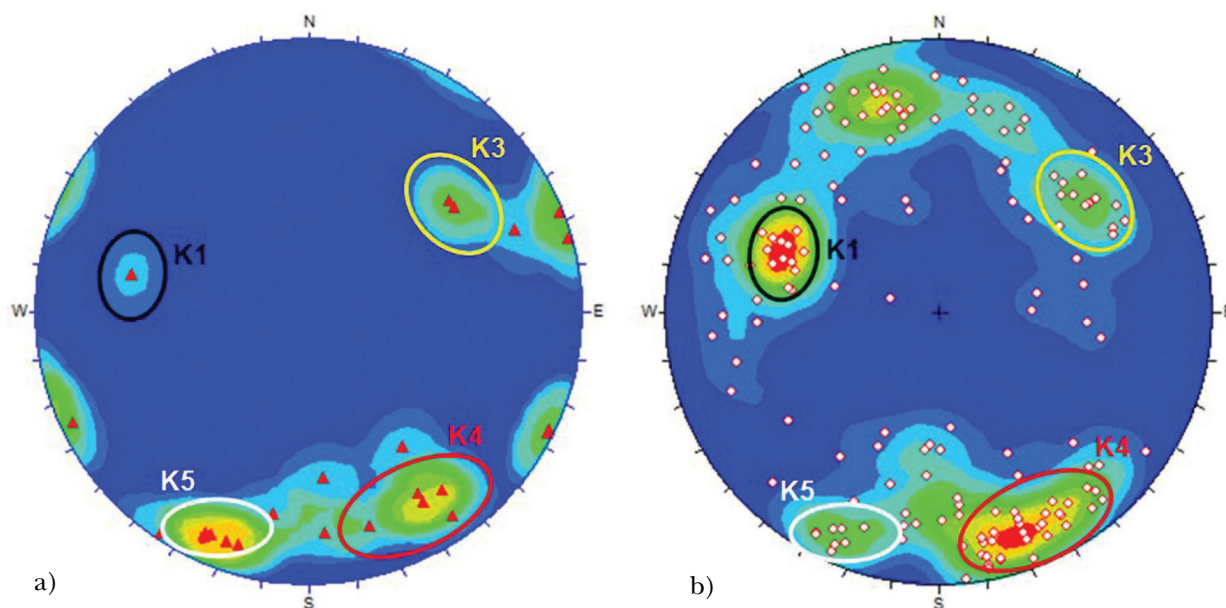


Fig. 7 – a) poli dei piani di discontinuità individuati mediante rilievo GPR; b) poli dei piani ottenuti mediante rilievo tradizionale.

Fig. 7 – a) poles of discontinuity planes identified by GPR survey; b) poles of discontinuity planes obtained from traditional survey.

mentre si rischia di perdere quelle tracce appartenenti a piani che se ne discostano. La non individuazione, tramite l'indagine GPR, di discontinuità appartenenti al sistema K2 non è tuttavia imputabile a quest'ultima considerazione, essendo tale famiglia appunto sub-parallela almeno al piano di rilievo "lato sud" del pilastro (Fig.5a). In questo caso anche dal rilievo geomeccanico condotto specificatamente su tale pilastro non è emersa la presenza di discontinuità attribuibili al sistema K2; tale famiglia è stata invece osservata in altre zone della cava. Trattandosi di ammasso poco fratturato non è detto che la famiglia K2 sia presente ovunque, la corrispondenza delle due metodologie di indagine adottate è quindi indice della bontà delle analisi GPR condotte.

4. Conclusioni

Nel presente studio sono state testate tecniche non invasive e di non-contatto per rilevare i piani di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso nella cava di marmo in sotterraneo denominata Piastreta, compresa all'interno del bacino marmifero carrarese.

A causa delle tecnologie di taglio impiegate, che restituiscono fronti perfettamente lisci, non si è potuto ricorrere all'utilizzo delle recenti tecniche di rilievo di non-contatto dei piani di discontinuità. Per ovviare a tale limite, tenendo conto dell'omogeneità compositiva e tessitura del materiale coltivato, si è sperimentato l'impiego di immagini digitali per la definizione delle tracce delle discontinuità. A tal fine è stato utilizzato un codice automatico basa-

to sulla sola informazione colorimetrica. Sono emersi alcuni limiti di tale tecnica, legati specificatamente all'ambiente in cui è stata applicata, che hanno portato ad un risultato sovrabbondante in termini di falsi positivi, ma al tempo stesso incompleto. In particolare, è stato possibile osservare come gli elementi lineari disposti in modo obliquo siano meno evidenti e continui rispetto a quelli che si sviluppano lungo l'asse verticale ed orizzontale delle immagini. Nonostante i limiti emersi, superabili con l'ottimizzazione del codice di calcolo, mediante questa tecnica è possibile investigare ammassi rocciosi parzialmente o totalmente inaccessibili, con una sostanziale riduzione dei tempi in fase di acquisizione dei dati rispetto al rilievo tradizionale.

In combinazione con il suddetto approccio, è stata testata l'applicazione della tecnica GPR, che al contrario permette di lavorare meglio in presenza di superfici di appoggio lisce. L'utilizzo del GPR ha fornito risultati sostanzialmente coerenti, dimostrando una buona affidabilità di tale tecnica nell'individuazione e nella parametrizzazione delle superfici di discontinuità in condizioni simili a quelle di studio. Nonostante questa tecnica non sostituisca i metodi di indagine diretta, rappresenta un'utile integrazione e validazione dei dati derivanti dal rilievo tradizionale ed una valida alternativa ai metodi di non-contatto in specifici contesti operativi. La tecnica GPR offre inoltre il vantaggio di poter direttamente valutare lo stato di fratturazione interno del volume indagato permettendo potenzialmente delle ricostruzioni tridimensionali di eventuali blocchi instabili.

Le analisi condotte nel presente lavoro si sono focalizzate essenzialmente sulla stima della giacitura di discontinuità chiuse, data la natura dell'ammasso roccioso considerato. Studi futuri riguarderanno la possibilità di dedurre informazioni anche sull'apertura e continuità delle discontinuità, in altri contesti geologici. Le proprietà sull'apertura possono essere infatti parzialmente deducibili con l'impiego del GPR posti i limiti di risoluzione della tecnica che variano in funzione delle caratteristiche dell'ammasso roccioso e del sistema GPR utilizzato. Allo stesso modo informazioni sulla continuità possono essere parzialmente deducibili dalla lunghezza dei riflettori individuati tramite il GPR.

Ringraziamenti

Gli autori intendono ringraziare lo Studio di Ingegneria Pandolfi di Carrara per il supporto logistico e per aver messo a disposizione numerosi dati. Inoltre si ringrazia la società **EzioRonchieri** S.p.A., proprietaria di cava Piastreta, per aver permesso l'accesso al cantiere.

Bibliografia

- CAO T., XIAO A., WU L., MAO L. (2017) – *Automatic fracture detection based on Terrestrial Laser Scanning data: a new method and case study*. Computers & Geosciences, 106, pp. 209-216.
- CARMIGNANI L., CONTI P., MASSA G., VASELLI L., MANCINI S. (2006) – *Lineamenti geologici delle Alpi Apuane*. Actaapuana, Suppl. V, pp. 9-23.
- CROSTA G. (1997) – *Evaluating rock mass geometry from photographic images*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 30, n. 1, pp. 35-58.
- DANIELS D.J. (2004) – *Ground Penetrating Radar – 2nd Edition*. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.
- DEB D., HARIHARAN S., RAO U.M., CHANG-HA RYU (2008) – *Automatic detection and analysis of discontinuity geometry of rock mass from digital images*. Computers & Geosciences, 34, n. 2, pp. 115-126.
- DÉROBERT X., ABRAHAM O. (2000) – *GPR and seismic imaging in a gypsum quarry*. Journal of Applied Geophysics, 45, pp. 157-169.
- DI PISA A., FRANCESCHELLI M., LEONI L., MECCHERI M. (1985) – *Regional variation of the metamorphic temperatures across the Tuscanid Unit and its implications on the alpine metamorphism (Apuan Alps, N-Tuscany)*. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen 151, pp. 197-211.
- FENG Q., ROSHOFF K. (2006) – *Semi-automatic mapping of discontinuity orientation at rock exposure by using 3D laser scanning techniques*. The 10th IAEG International Congress, Nottingham, UK. Paper number 751.
- FERRERO A.M., FORLANI G., RONCELLA R., VOYAT H.I. (2009) – *Advanced geostructural survey methods applied to rock mass characterization*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 42, pp. 631-665.
- FERRERO A.M., GODIO A., SAMBUELLI L., VOYAT I.H. (2007) – *Geophysical and Geomechanical Investigations Applied to the Rock Mass Characterisation for Distinct Element Modelling*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 40, n. 6, pp. 603-622.
- FRANCESCHELLI M., LEONI L., MEMMI I., PUXEDDU M. (1986) – *Regional distribution of Al-silicates and metamorphic zonation in the low-grade Verrucanometasediments from the Northern Apennines, Italy*. Journal of Metamorphic Geology, 4, n. 3, pp. 309-321.
- GIGLI G., CASAGLI N. (2011) – *Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48, n. 2, pp. 187-198.
- HANEBERG W.C. (2006) – *3-D rock mass characterization using terrestrial digital photogrammetry*. AEG News, 49, pp. 12-15.
- INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS (ISRM) (1978) – *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 15, pp. 319-368.
- JOLIVET L., FACCENNA C., GOFFÉ B., MATTEI M., ROSSETTI F., BRUNET C., STORTI F., FUNICIELLO R., CADET J.P., D'AGOSTINO N., PARRA T. (1998) – *Midcrustal shear zones in postorogenic extension: example from the northern Tyrrhenian Sea*. Journal of Geophysical Research – Solid Earth, 103, n. B6, pp. 12123-12160.
- KADIOGLU S. (2008) – *Photographing layer thicknesses and discontinuities in a marble quarry with 3D GPR visualization*. Journal of Applied Geophysics, 64, pp. 109-114.
- KEMENY J., DONOVAN J. (2005) – *Rock mass characterization using LiDAR and automated point cloud processing*. Ground Engineering, 38, n. 11, pp. 26-29.
- KEMENY J., POST R. (2003) – *Estimating three – dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces*. Computers & Geosciences, 29, n. 1, pp. 65-77.
- LATO M., VÖGE M. (2012) – *Automated mapping of rock discontinuities in 3D LIDAR models*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 54, pp. 150-158.
- LEMY F., HADJIGEORGIOU J. (2003) – *Discontinuity trace map construction using photographs of rock exposures*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 40, pp. 903-917.
- LI X., CHEN J., ZHU H. (2016) – *A new method for automated discontinuity trace mapping on rock mass 3D surface model*. Computers & Geosciences, 89, pp. 118-131.
- MOHEBBI M., YARAHMADI BAFGHI A.R., FATEHI MARJI M., GHOLAMNEJAD J. (2017) – *Rock mass structural data analysis using image processing techniques (Case study:*

- Choghartiron oremine northern slopes*). Journal of Mining & Environment, 8, n. 1, pp. 61-74.
- MOLLI G., GIORGETTI G., MECCHERI M. (2000) – *Structural and petrological constraints on the tectono-metamorphic evolution of the Massa Unit (Alpi Apuane, NW Tuscany, Italy)*. Geological Journal, 35, n. 3-4, pp. 251-264.
- ORLANDO L. (2003) – *Semiquantitative evaluation of massive rock quality using ground penetrating radar*. Journal of Applied Geophysics, 52, n. 1, pp. 1-9.
- PORSANI J.L., SAUCK W.A., JUNIOR A.O.S. (2006) – *GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: a case study from southern Brazil*. Journal of Applied Geophysics, 58, n. 3, pp. 177-187.
- POST R., KEMENY J., MURPHY R. (2001) – *Image processing for automatic extraction of rock joint orientation data from digital images*. Proc. 38th US Rock Mechanics Symposium, Washington, DC. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 877-884.
- REID T.R., HARRISON J.P. (2000) – *A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 37, pp. 1073-1089.
- REY J., MARTINEZ J., VERA P., RUIZ N., CANADAS F., MONTIEL V. (2015) – *Ground-penetrating radar method used for the characterization of ornamental stone quarries*. Construction and Building Materials, 77, pp. 439-447.
- RIQUELME A.J., ABELLÁN A., TOMÁS R., JABOYEDOFF M. (2014) – *A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds*. Computers & Geosciences, 68, pp. 38-52.
- RONCELLA R., FORLANI G. (2005) – *Extraction of planar patches from point clouds to retrieve dip and dip direction of rock discontinuities*. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop 'Laser scanning 2005' Enschede.
- SIRGIOVANNI E. (2009) – *Relazione geologica, geomorfologica, idrogeologica e geostrutturale e relazione tecnica generale (cava "Piastreta")*. Report interno.
- SLOB S., HACK H.R.G.K., FENG Q., RÖSHOFF K., TURNER A.K. (2007) – *Fracture mapping using 3D laser scanning techniques*. Proceedings of the 11th congress of the International Society for Rock Mechanics, Lisbon, Portugal. vol. I, pp. 299-302.
- SOBEL I., FELDMAN G. (1968) – *A 3x3 Isotropic Gradient Operator for Image Processing*. Presented at the Stanford Artificial Intelligence Project (SAIL) in 1968. https://www.researchgate.net/publication/239398674_An_Isotropic_3_3_Image_Gradient_Operator [accessed Jul 14, 2017].
- STURZENEGGER M., STEAD D. (2009) – *Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts*. Engineering Geology, 106, pp. 163-182.
- TRINKS I., CLEGG P., MCCAFFREY K., JONES R., HOBBS R., HOLDSWORTH B. (2005) – *Mapping and analyzing virtual outcrops*. Visual Geosciences, 10, pp. 13-19.
- UMILI G., FERRERO A.M., EINSTEIN H.H. (2013) – *A new method for automatic discontinuity traces sampling on rock mass 3D model*. Computers & Geosciences, 51, pp. 182-92.
- VACCANEO D., SAMBUELLI L., MARINI P., TASCONE R. (2004) – *Measurement system of complex permittivity of ornamental rocks in L Frequency Band*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42, n. 11.
- VASELLI L., OTTRIA G., MOLLI G., CORTOPASSI G. (2007) – *Studio geologico – strutturale dei sistemi di deformazione fragile dei marmi delle Alpi Apuane finalizzato alla ricostruzione del campo dipaleostress (cava "Piastreta")*. Report interno.

Underground application of photographic and GPR techniques for discontinuity survey

Abstract

The survey of the geometric characteristics of discontinuities in a rock mass is fundamental for the evaluation of potential detachable blocks. However, in particular contexts, such as ornamental stone quarries, traditional survey could lead to inaccurate and incomplete results, due to the conditions of faces and excavation environment. To overcome, at least partially, such limitations, more and more frequently non-contact survey techniques are used, based on digital photography for mapping traces and on digital photogrammetry or laser scanner for surveying discontinuity planes. Also geophysical techniques, such as georadar, can be coupled to them. In this research, the applicability of these techniques inside Cava Piastreta, an underground marble quarry in the Apuane Alps, has been evaluated. Ground penetrating radar was found to be particularly effective, due to its performances on perfectly smooth excavation faces: results were found to be coherent with those obtained from traditional survey. Conversely non-contact surveys suffered from limitations imposed by faces conditions.